干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

祁连山北麓中段青海云杉林土壤水热时空变化特征

马 剑[1,2,3,4]， 刘贤德[1,2,3,4]， 李 广[1]， 赵维俊[2,3,4]，
王顺利[2,3,4]， 敬文茂[2,3,4]， 马雪娥[2,3,4]
（1 甘肃农业大学林学院，甘肃 兰州 730070； 2 甘肃省祁连山水源涵养林研究院，甘肃 张掖 734000；
3 甘肃祁连山森林生态监测与评估国际科技合作基地，甘肃 张掖 734000；
4 甘肃省祁连山森林生态系统野外科学观测研究站，甘肃 张掖 734000 ）

摘 要： 以祁连山北麓中段青海云杉林为研究对象，利用5套土壤温湿度自动监测系统对海拔2 500～3 300 m的青海云杉连续监测3 a，旨在探讨青海云杉林土壤水热的变化特征及土壤水热间的互作效应。结果表明：(1)7:00～19:00，土壤温度整体上呈升高趋势，8:00土壤均温最低，为1.03 ℃，18:00土壤均温最高，为1.32 ℃；土壤湿度的变化幅度较小，且差异不显著($P>0.05$)。(2)冷期（1～4月、11～12月）、暖期（5～10月），各占全年的50%；8月前随月份增大土壤温湿度增大，月份增大1月，土壤均温增大2.21 ℃，湿度增大0.021 $m^3 \cdot m^{-3}$，8月后随月份增大逐渐减小，月份增大1月，土壤均温减小3.12 ℃，湿度减小0.017 $m^3 \cdot m^{-3}$。(3)土壤温度与海拔之间有负相关关系($R^2=0.81, P<0.05$)；土壤湿度与海拔之间存在二项式相关关系($R^2=0.95, P<0.05$)。(4)土壤温度与土层深度间呈负相关关系($P<0.05$)，而土壤湿度与土层深度呈线性正相关关系($P<0.05$)，土层每增加一层，土壤均温减小0.142 ℃，湿度约增加0.009 $m^3 \cdot m^{-3}$。(5)青海云杉林土壤温度和湿度间呈显著线性负相关关系($P<0.05$)。

关 键 词： 土壤温度；土壤湿度；变化特征；青海云杉林；祁连山
文章编号： 1000－6060(2020)04－1033－08(1033～1040)

土壤是植物生存的基质，决定着生态系统的结构、功能和生产力水平[1]。土壤含水量和温度作为土壤的重要物理特性，对土壤有机质的矿化、生物固氮等化学或生物过程有着深刻的影响[2]，进而影响着植物的生产力及地理分布[3-4]。土壤水热状况受气候、地形、土壤自身物理特性等众多因子的影响[5]，尤其高山地区的土壤冻融过程对土壤温度和含水量有着巨大的影响[6]。森林土壤是森林生态系统发挥水源涵养功能的主要载体，直接影响生态系统的水文过程[7]，土壤水热的分布特征和动态变化影响着植被生态系统土壤的生物和非生物生态学过程，对植被生态系统的稳定具有重要意义。

近年来，关于祁连山土壤水热特征已开展了诸多研究，如赵维俊等[8]研究了祁连山林草复合流域土壤温湿度时空特征，发现林草地浅层土壤温度日变化呈正弦曲线变化，林草地土壤湿度日变化不受太阳辐射的影响。胡健等[9]对祁连山排露沟流域海拔梯度上土壤温湿度的变化规律进行了研究，认为海拔每升高100 m，0～10 cm土层湿度增加0.027 $m^3 \cdot m^{-3}$，温度降低0.32 ℃。牛赟等[10]对祁连山大野口流域土壤水热的空间变化特征进行了探究，发现随海拔升高，土壤水分的增大率约为2.35%·(100 m)$^{-1}$，土壤温度的降低率约为0.74 ℃·(100 m)$^{-1}$。唐振兴等[11]分析了祁连山中段林草交错带土壤水热特征，发现土壤温度年内变化与气温一致，土壤水分年内变化较为复杂。上述研究虽然对高寒山区土壤水热过

收稿日期： 2019－07－23； **修订日期：** 2019－12－30
基金项目： 甘肃省自然科学基金重大项目(18JR4RA002)；甘肃省林业科技计划项目(2018kj014，2018kj016)资助
作者简介： 马剑(1986－)，男，高级工程师，博士研究生，研究方向为森林与土壤生态. E-mail:405153416@qq.com
通讯作者： 刘贤德. E-mail: shyliuxiande@163.com

程有了一定程度的认识，但连续时间序列的土壤水热研究工作还不够深入，点尺度上的连续监测仍然缺乏。因此，本研究利用土壤温湿度自动观测系统进行长期定位监测，从而弥补相关研究中的不足。本文通过分析2015年6月～2018年6月的土壤温度和湿度观测数据，重点探讨以下问题：(1) 利用长期连续定位监测数据分析研究区青海云杉林土壤水热变化特征，揭示土壤水热时空变化规律。(2) 建立青海云杉林土壤水热间的耦合关系，阐明土壤水热间的互作效应。

1 研究区概况

研究区位于祁连山北麓中段的大野口流域，中心地理坐标100°15′ E，38°31′ N，流域总面积73.32 km²，海拔2 590～4 645 m[12]。年平均气温-0.6～2.0 ℃，年均日照时数1 893 h，日辐射总量均值为110.28 kW·m⁻²，年均降水量为433.6 mm，年均蒸发量为1 081.7 mm，年均相对湿度为60%，属高寒半干旱山地森林草原气候[13]。流域水热条件差异大，形成了多种植被类型和土壤类型，其中植被类型主要有森林草原带、森林灌丛带、亚高山灌丛草甸带、高山草甸带和高山寒漠带，土壤类型主要有山地栗钙土、山地灰褐森林土、山地森林草甸土、亚高山灌丛草甸土和高山草甸土。建群树种青海云杉呈斑块状或条状分布在海拔2 600～3 300 m阴坡和半阴坡地带，与阳坡草地犬齿交错分布；灌木优势种有金露梅(*Potentilla fruticasa*)、鬼箭锦鸡儿(*Caragana jubata*)和吉拉柳(*Salix gilashanica*)等，草本主要有珠牙蓼(*Polygonum viviparum*)、黑穗苔(*Carex atrata*)、苔草(*Carex tristachya*)、马苋蒿(*Pedicularis ikomai Sasaki*)和针茅(*Stipa sp*)等[14]。

2 研究方法

2.1 野外观测设计

在祁连山中段沿海拔2 500 m、2 700 m、2 900 m、3 100 m和3 300 m选择典型林分布设5套土壤温湿度自动观测系统，该系统主要包括土壤温湿度数据传感器(HydraProbe，土壤温度传感器范围：-30～55 ℃，精度：±0.1 ℃；土壤湿度传感器范围：干～饱和，单位：m³·m⁻³，精度：±0.03)及其数据采集器(HOBO U30)。数据传感器探头布设深度为：10 cm、20 cm、40 cm、60 cm；土壤温湿度采用温湿度数据采集记录器(HOBO)采集。5套土壤温湿度测定系统的观测频度均为30 min记录1次，日变化及小时变化为30 min测定值的均值，连续监测3 a(2015年6月～2018年6月)。在正式观测之前，采用土壤针式温度计和TDR土壤水分测定仪记录土壤温度、土壤含水量等数据，对观测试验数据进行了反复的校对，土壤温湿度自动监测仪所获取的观测数据可靠。

2.2 数据处理与分析

将收集到的数据按每小时、每天、每月进行平均处理，把7:00到19:00的数据视为一天进行整理，对连续监测3 a的数据用Excel 2010计算，获得均值，利用SPSS 20.0软件对数据进行统计分析，采用Excel 2010软件绘制图表。文中所有数据均为平均结果，数据处理采用以下公式：

$$\text{逐日平均处理：} \bar{A}_{day} = \frac{\sum a}{48} \tag{1}$$

式中：$\bar{A}_{day}$ 表示处理后的逐日观测因子；a 为变量观测值；$\sum a$ 为变量观测值求和。

$$\text{逐月平均处理：} \bar{A}_{month} = \frac{\sum a}{48M} \tag{2}$$

式中：$\bar{A}_{month}$ 表示处理后的逐月观测因子；a 为变量观测值；M 为变量观测时段所处月份的天数；$\sum a$ 为变量观测值求和。

3 结果与分析

3.1 土壤水热的时间变化特征

3.1.1 土壤水热日变化 图1为土壤水热的日变化动态图，经分析发现土壤温度与时间(7:00～19:00)变化趋势呈二次多项式，$y=0.000\ 2x^2+0.027\ 1x+0.968\ 3$，决定系数较高，为0.941 4，差异显著($P<0.05$)。土壤温度随着时间的增加，整体上呈升高趋势，7:00～8:00之间，土壤温度呈降低趋势，8:00土壤温度最低，为1.03 ℃，8:00～18:00，土壤温度逐渐升高，18:00土壤温度最高，为1.32 ℃。从图1可以看出土壤湿度与时间的相关系不强，差异不显著($P>0.05$)，各时间段的土壤湿度接近，这是因为在高寒山区山地森林的季节冻融过程比较明显，土壤中的水分白天消融、晚上冻结，这一过程有利于土壤中水分的维持。

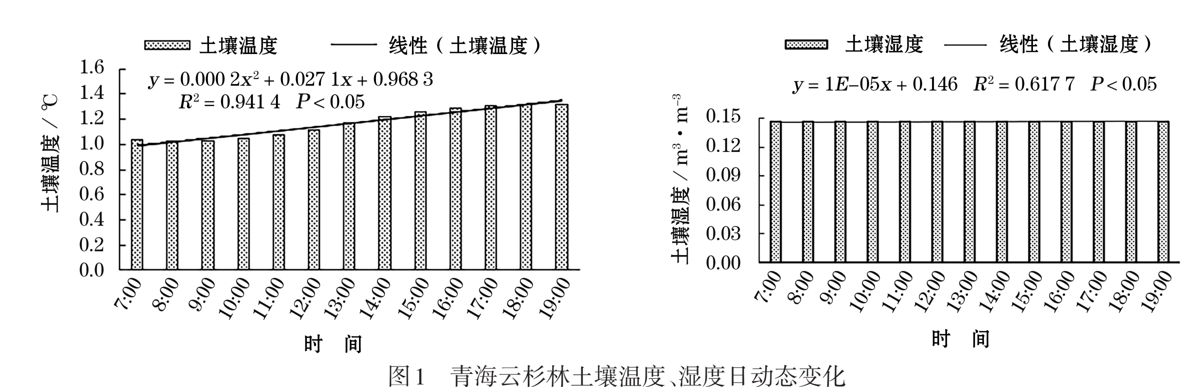


图1　青海云杉林土壤温度、湿度日动态变化

Fig. 1　Diurnal variation of soil temperature and soil moisture in *Picea crassifolia*

3.1.2　土壤水热月变化特征　青海云杉林土壤水热的月动态变化特征见图2，由图可以看出土壤水热与月份有着很强的显著性（$P < 0.05$），两者月动态变化趋势为三次多项式关系。

关系式为：

$$y_T = -0.052\ 6x^3 + 0.646\ 8x^2 + 0.047\ 4x - 8.194\ 7 \quad (R^2 = 0.926\ 2) \qquad (1)$$

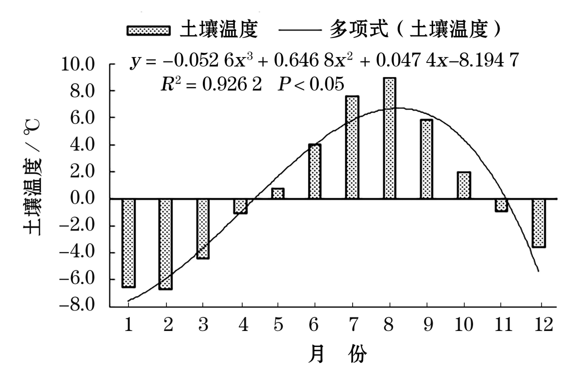
$$y_m = -0.000\ 9x^3 + 0.012\ 6x^2 - 0.027\ 4x + 0.068\ 9 \quad (R^2 = 0.954\ 5) \qquad (2)$$

式中：回归决定系数均大于0.9，说明两者变化趋势更接近于三次曲线。研究表明，土壤温度在0 ℃以下的时期为一年冷期，0 ℃以上的时期为暖期[15]。由图可以看出6个月（1～4月，11～12月）土壤温度小于0 ℃，即冷期为6个月，占全年的50%；6个月（5～10月）土壤温度大于0 ℃，即暖期为6个月，占全年的50%，由此可见该研究区域冷期和暖期的时间相同。8月前，随着月份增加，土壤温度逐渐增加，平均增加率2.21 ℃·mon⁻¹，8月土壤温度均值最大，为8.92 ℃；8月后，随着月份增加，土壤温度逐渐减小，其降低率为3.12 ℃·mon⁻¹，可见土壤温度的递减速率大于其递增速率，8月以后土壤温度的下降速度较快，公式（1）可以有效地验证该结论。

由图2还可以看出，土壤湿度随月份增加呈先增加后减小趋势，8月前土壤湿度逐渐增加，月份每增加1月，土壤湿度平均增加0.021 m³·m⁻³，8月土壤湿度均值最大，为0.211 m³·m⁻³；8月后土壤湿度逐渐减小，月份每增加1月，土壤湿度平均减小0.017 m³·m⁻³，可见土壤湿度的递增速率大于递减速率，可利用公式（2）验证该结论。

3.2　土壤水热的空间变化特征

3.2.1　土壤水热海拔变化特征　由图3反映了研究区青海云杉林土壤温湿度的海拔变化特征，对不同海拔梯度的土壤温度、土壤湿度进行了回归拟合和显著性检验，结果表明：土壤温度与海拔之间有负相关关系 $y = -0.524\ 7x + 2.526\ 8$（$R^2 = 0.806\ 1$），两者差异显著（$P < 0.05$）。海拔2 500 m、2 700 m、2 900 m、3 100 m和3 300 m处的土壤温度均值分别为：1.86 ℃，1.35 ℃，1.13 ℃，1.01 ℃和−0.60 ℃，随海拔升高，土壤温度呈降低趋势，降低率约为0.31 ℃·(100 m)⁻¹。在一定的区域内，太阳辐射能的输入、土壤蒸散潜能及土壤导热率等对土壤温度的空间分布影响较大，太阳辐射能主要受气候变化的影



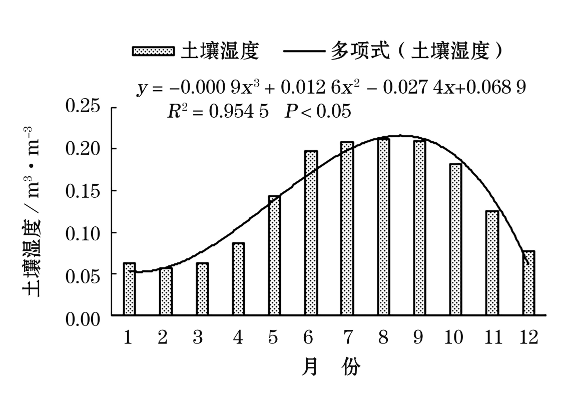


图2　青海云杉林土壤温度、湿度月动态变化

Fig. 2　Monthly variation of soil temperature and soil moisture in *Picea crassifolia*

响，随着海拔升高，气温逐渐降低，降水、风速、空气湿度不断增加，随着降水、风速变大，土壤的蒸发潜能变大，同时土壤表面湿度越大，对太阳辐射能的反射也越大，土壤温度越低。

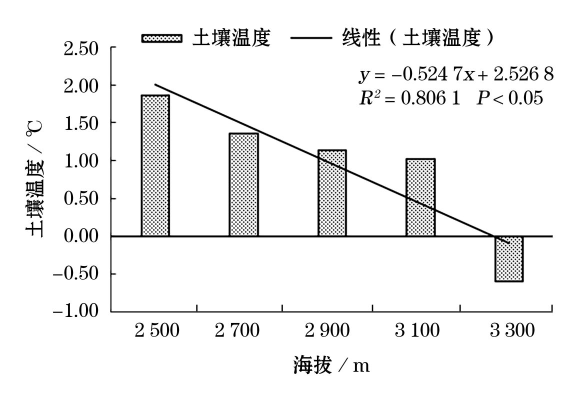
土壤湿度与海拔之间的关系为：$y=-0.010\ 5x^3+0.083\ 1x^2-0.151\ 5x+0.151\ 0$（$R^2=0.954\ 5$），两者差异显著（$P<0.05$）。海拔2 500 m、2 700 m、2 900 m、3 100 m和3 300 m处的土壤湿度均值分别为：0.075 $m^3\cdot m^{-3}$、0.085 $m^3\cdot m^{-3}$、0.176 $m^3\cdot m^{-3}$、0.189 $m^3\cdot m^{-3}$和0.156 $m^3\cdot m^{-3}$。随海拔升高，土壤湿度先增大后减小，海拔3 100 m处土壤湿度均值最大，为0.189 $m^3\cdot m^{-3}$。在研究区降水是影响土壤水分的主要因素，海拔通过影响降水进一步影响土壤湿度，随着海拔升高降水量呈增加趋势，降水量越大，土壤湿度也越高。

3.2.2 土壤水热剖面变化特征 图4反应了研究区青海云杉林土壤水热的垂直变化特征，经回归拟合和显著性检验发现，土壤温度和土层深度间呈负相关关系$y=-0.157\ 5x+1.022\ 5$，决定系数较高（$R^2=0.916\ 8$），差异显著（$P<0.05$），随着土层深度不断增加，土壤均温不断减小，土层每增加一层，土壤均温减小0.142 ℃。其原因为土壤温度主要受太阳辐射能及气候变化的影响[16]。土层越深，接受到的太阳辐射能越少，温度越低。

研究还发现土壤湿度与土层深度存在线性正相关关系，$y=0.009\ 2x+0.115\ 3$，$R^2=0.887\ 3$，差异显著（$P<0.05$），随着土层深度增加，土壤湿度均值不断增加，土层每增加一层，土壤湿度约增加0.009 $m^3\cdot m^{-3}$。其主要原因是，土壤表层是空气层的交界层，土壤水分的蒸发强度较大，表层土壤湿度较低，由于土壤水分在自身重力的作用下向下传输，深层土壤湿度较大。同时60 cm左右是青海云杉根系的分布区，这些根系的存在有利于形成水分储蓄的土壤层，具有较强的持水能力，土壤湿度较大。

3.3 土壤温度和湿度的关系

图5反映了研究区青海云杉林土壤温度和土壤湿度的拟合关系，分析发现土壤温度和湿度间呈线性负相关关系，递减程度差异显著（$P<0.05$）。当土壤温度为0.429 ℃时，土壤湿度最大，为0.156 $m^3\cdot m^{-3}$；土壤温度为0.856 ℃时，土壤湿度最小，为0.128 $m^3\cdot m^{-3}$。土壤温度从0.429 ℃到0.856 ℃，增加了



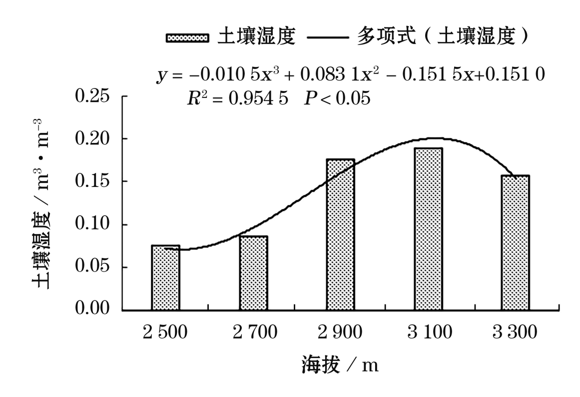
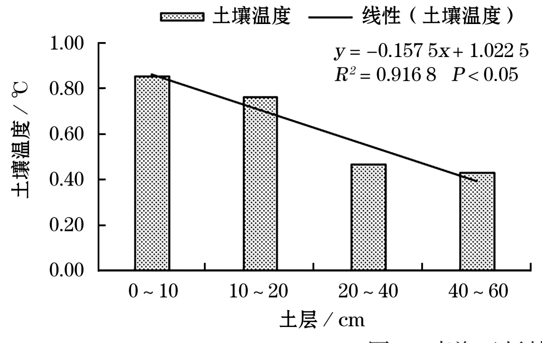


图3 青海云杉林土壤温度、湿度沿海拔变化

Fig. 3 Variation of soil temperature and soil moisture along elevation in *Picea crassifolia*



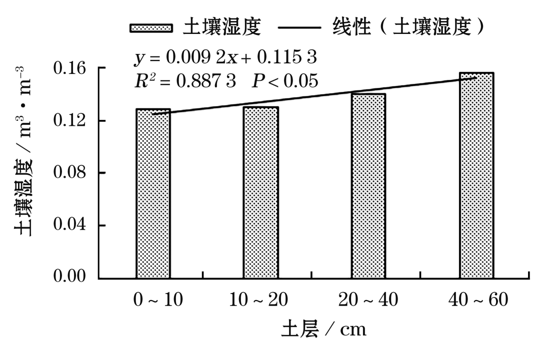


图4 青海云杉林土壤温度、湿度垂直变化

Fig. 4 Vertical variation of soil temperature and soil moisture in *Picea crassifolia*

0.427 ℃，而土壤湿度从0.156 $m^3 \cdot m^{-3}$到0.128 $m^3 \cdot m^{-3}$，减小了0.028 $m^3 \cdot m^{-3}$。对整个青海云杉林而言，土壤温度平均增加率为49.8%，土壤湿度平均递减率为21.5%。由此表明，在一定的环境条件下可以通过降低土壤温度来提高土壤湿度，而气温是影响土壤温度的主要因子，可以通过降低气温控制土壤温度，从而达到增加土壤水分的目的。青海云杉林是祁连山水源涵养林主要的建群树种，土壤水分的多少对其生长有着决定性的作用，在青海云杉林经营管理中应高度重视土壤水分的作用，考虑通过控制土壤温度来增加土壤水分，促进云杉林区的健康发展，使其更好地发挥经济效益、生态效益和社会效益。

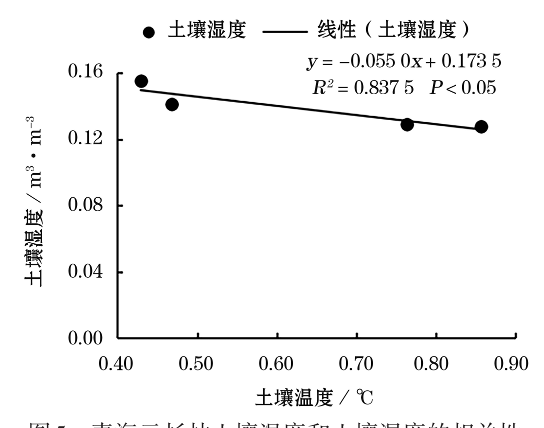


图5　青海云杉林土壤温度和土壤湿度的相关性

Fig. 5　Correlation between soil temperature and soil moisture of *Picea crassifolia*

4　讨　论

（1）车宗玺等[17]研究发现祁连山西段一年冷期占全年的42%，暖期占58%，暖期时间长于冷期，而本研究发现冷期和暖气均为6个月。这是因为祁连山从东到西降水逐渐减少，日照时数逐渐增大，导致土壤水分含量降低，土壤逐渐干化。该研究还发现8月前，土壤温度平均增大了2.21 ℃，土壤湿度平均增大0.021 $m^3 \cdot m^{-3}$；8月后，土壤平均温度降低了3.12 ℃，土壤平均湿度降低了0.017 $m^3 \cdot m^{-3}$。在祁连山高寒地区，气温和降水是影响土壤温度和水分的主要因子，本研究只考虑了土壤温湿度的变化情况，而没有考察降水和气温的变化情况，在今后的土壤温湿度变化研究中，应该同步研究气温、降水的变化，这样可以使得研究更有意义。

（2）牛赟等[10]研究认为，土壤体积含水量和土层深度呈二次函数的抛物线变化趋势，土壤水分随着土层深度增加呈先增大后减小趋势，而车宗玺等[17]研究发现，土壤水分与土层深度存在负相关关系，随着土壤深度的增大，土壤水分减小。该研究结果与以上结果存在不一致，土壤湿度与土层深度存在二项式相关关系，随着土层深度增加，土壤湿度不断增加。其原因是：牛赟等的研究中涉及了乔、灌、草，他认为当土壤深度超过27.94 cm，植物的根系减少，在一定程度上影响了根系对土壤结构及理化性质的改善，导致土壤容重增大，土壤水分降低，而本研究只针对青海云杉林，由于研究区土层比较薄，且存在季节性冻土，加上青海云杉林根系分布较浅，平均分布深度在60 cm左右，大量根系的存在有利于形成土壤水分传输的土层，同时还由于土壤水分的自身重力作用，不断向下积累，土壤水分逐渐增加；而车宗玺等主要研究了祁连山西段草地的土壤水分变化特征，草本是浅根性植被，深层土壤中根系对土壤的改善能力不足，土壤密度增大，土壤含水量减小，再者土壤水分含量在土壤剖面上分布异质程度很高，导致不同研究区域可能存在差异。

（3）本研究还发现，土壤温度和土层深度间呈显著的负相关线性关系，这一结论与李莎[18]、胡健等[9]的研究结果一致，但与车宗玺等[17]的研究不一致。其主要原因是，在青海云杉林中随着土层的增加，深层土壤无法接受穿过林隙的太阳光照辐射，太阳辐射只能以热传导和热对流的形式由浅层土壤传递到深层，而随着土层深度增加，热传导和热对流所携带的能量逐渐减弱，导致土壤温度逐渐降低；此外，青海云杉林下苔藓层较厚，在一定程度上延缓了太阳辐射在土壤中的传导和扩散，导致土壤温度随土层深度的增加而降低。

（4）胡健等[9]发现海拔每升高100 m，0～10 cm和10～20 cm的土壤温度分别降低0.32 ℃和0.28 ℃。尽管本研究中使用的土壤温度数据为0～60 cm土层平均数据，但是也得出了相似的结果，随着海拔升高，土壤温度呈降低趋势，降低率约为0.31 ℃·$(100\ m)^{-1}$。而祁连山大野口流域土壤温度随海拔升高逐渐降低，递减率为0.8 ℃·$(100\ m)^{-1}$[10]。这主要是因为在牛赟等人的研究中，数据来源于不同植被类型，不同坡向的土壤。土壤温度除了与海拔、经度、纬度等有关外，还与植被类型、地表覆盖、

土壤质地等有关，特别是亚高山地带，土壤温度明显受局地因素的影响[19]。

（5）已有研究表明土壤温度和土壤水分具有显著负相关关系[20-21]或负相关不显著[22]。本研究也得出相似的研究结果，土壤温度和土壤水分表现为显著的负相关关系。有研究还表明土壤温度和土壤水分的相关性与采样粒度和尺度有很大的关系[23]，随着野外监测水平的不断提高，利用土壤温湿度自动观测系统对土壤温度和土壤湿度进行实时动态监测，可以有效地避免因采样粒度或尺度不同所产生的差异。

5 结 论

本文利用土壤温湿度自动观测系统对祁连山北麓中段青海云杉林的土壤温湿度进行了连续3 a监测，分析了二者的时空变化规律，建立了土壤水热的相关关系，阐明了两者的耦合机制。主要结论如下：

（1）土壤水热日变化规律为：在7:00～19:00时间段内，土壤湿度日变化幅度较小且不显著，10:00和11:00时的土壤湿度值最小，均为0.146 $m^3\cdot m^{-3}$。随着时间的增加，土壤温度整体上呈升高趋势，8:00土壤温度最低，为1.03 ℃，18:00土壤温度最高，为1.32 ℃。

（2）该研究区冷期和暖气均为6个月，各占全年的50%。8月前，土壤平均温度增大了2.21 ℃，土壤平均湿度增大0.021 $m^3\cdot m^{-3}$；8月后，土壤平均温度降低了3.12 ℃，土壤平均湿度降低了0.017 $m^3\cdot m^{-3}$。8月后土壤温度平均递减速率大于8月前的土壤温度平均递增速率，8月前土壤湿度平均递增速率大于8月后的土壤湿度平均递减速率。

（3）土壤温度与海拔之间有负相关关系 $y=-0.524\,7x+2.526\,8$（$R^2=0.806\,1$），两者差异显著（$P<0.05$）。土壤湿度与海拔之间的关系为：$y=-0.010\,5x^3+0.083\,1x^2-0.151\,5x+0.151\,0$（$R^2=0.954\,5$），随海拔升高，土壤湿度先增大后减小，海拔3 100 m处土壤湿度均值最大，为0.189 $m^3\cdot m^{-3}$。

（4）土壤温度和土层深度（0～60 cm）呈负相关关系（$R^2=0.916\,8$，$P<0.05$）；土壤湿度与土层深度存在二项式相关关系（$R^2=0.952\,6$；$P<0.05$）。

（5）土壤温度和湿度间的关系为：$y=-0.055\,0x+0.173\,5$（$P<0.05$）。

参考文献（References）

[1] 贾文雄，陈京华，张禹舜，等. 祁连山北坡草地植物群落特征与土壤水热因子的关系[J]. 生态学杂志，2016，35(3)：661－667. [JIA Wenxiong，CHEN Jinghua，ZHANG Yushun，et al.The relationship of characteristics of meadow communities with soil moisture and temperature in the northern slope of Qilian Mountains[J]. Chinese Journal of Ecology，2016，35(3)：661－667.]

[2] KÖRNER C. Alpine plant life：Functional plant ecology of mountain ecosystems [M]. Berlin & Heidelberg：Springer-Verlag，2003.

[3] CHAPIN F S III，MATSON P A，MOONEY H A. Principles of terrestrial ecosystem ecology[M]. New York：Springer-Verlag，2002.

[4] 俞洁辉，刘新圣，罗天祥，等. 念青唐古拉山北麓草甸海拔分布上限土壤温湿度的季节变化[J]. 地理学报，2012，67(9)：1246－1254. [YU Jiehui，LIU Xinsheng，LUO Tianxiang，et al. Seasonal variations of soil temperature and moisture at the upper limit of alpine meadow in north-facing slope of the Nianqing-tanggula Mountains[J]. Acta Geographica Sinica，2012，67(9)：1246－1254.]

[5] STOYAN H，DEPOLLI H，BöHM S，et al. Spatial heterogeneity of soil respiration and related properties at the plant scale[J]. Plant & Soil，2000，222(1/2)：203－214.

[6] 田克明，刘景时，康世昌，等. 西藏纳木错流域冻土环境初步研究[J]. 地球科学进展，2006，21(12)：1324－1332. [TIAN Keming，LIU Jingshi，KANG Shichang，et al. A primary study of the environment of frozen ground in the Namco Basin，Tibet[J]. Advances in Earth Science，2006，21(12)：1324－1332.]

[7] 牛赟，刘贤德，王立，等. 祁连山大野口流域青海云杉林分结构及其土壤水热特征分析[J]. 生态环境学报，2014，23(3)：385－391. [NIU Yun，LIU Xiande，WANG Li，et al. Feature analysis on stand structure of *Picea crassifolia* and its water and temperature of soil in Dayekou Basin of Qilian Mountains[J]. Ecology and Environmental Sciences，2014，23(3)：385－391.]

[8] 赵维俊，刘贤德，金铭，等. 祁连山林草复合流域土壤温湿度时空变化特征[J]. 土壤，2018，50(4)：795－802. [ZHAO Weijun，LIU Xiande，JIN Ming，et al. Spatio-temporal change characteristics of soil temperatures and moistures in forest and grass complex basin in Qilian Mountains[J]. Soil，2018，50(4)：795－802.]

[9] 胡健，吕一河，傅伯杰，等. 祁连山排露沟流域土壤水热与降雨脉动沿海拔梯度变化[J]. 干旱区研究，2017，34(1)：151－160. [HU Jian，LV Yihe，FU Bojie，et al. Soil hydrothermal variation and rainfall pulses along altitudinal gradient in Pailugou Watershed in the Qilian Mountain[J]. Arid Zone Research，2017，34(1)：151－160.]

[10] 牛赟，刘贤德，苗毓鑫，等. 祁连山大野口流域土壤水热空间变化特征研究[J]. 冰川冻土，2015，37(5)：1353－1360. [NIU Yun，LIU Xiande，MIAO Yuxin，et al. Research on the spatial variation characteristics of soil moisture and temperature in Dayekou Basin of the Qilian Mountains[J]. Journal of Glaciolo-

gy and Geocryology,2015,37(5):1353－1360.]

[11] 唐振兴,何志斌,刘鹄. 祁连山中段林草交错带土壤水热特征及其对气象要素的响应[J]. 生态学报,2012,32(4):1056－1065.[TANG Zhenxing,HE Zhibin,LIU Hu. Soil moisture and temperature characteristics of forest-grassland ecotone in middle Qilian Mountains and the responses to meteorological factors[J]. Acta Ecologica Sinica,2012,32(4):1056－1065.]

[12] 赵维俊,敬文茂,赵永宏,等. 祁连山大野口流域典型灌丛植物与土壤中氮磷的化学计量特征[J]. 土壤,2017,49(3):572－579.[ZHAO Weijun,JING Wenmao,ZHAO Yonghong,et al. Nitrogen and phosphorus stoichiometry of plants and soils of typical shrubs in Dayekou Basin of Qilian Mountains[J]. Soil,2017,49(3):572－579.]

[13] 李效雄,刘贤德,赵维俊. 祁连山大野口流域青海云杉种群结构和空间分布格局[J]. 干旱区地理,2012,35(6):960－967.[LI Xiaoxiong,LIU Xiande,ZHAO Weijun,et al. Population structure and spatial distribution pattern of *Picea crassifolia* in Dayekou Basin of Qilian Mountains[J]. Arid Land Geography,2012,35(6):960－967.]

[14] 马剑,刘贤德,李广,等. 祁连山中段青海云杉林土壤肥力质量评价研究[J]. 干旱区地理,2019,42(6):1368－1377.[MA Jian,LIU Xiande,LI Guang,et al. Evaluation on soil fertility quality of *Picea crassifolia* forest in middle Qilian Mountains[J]. Arid Land Geography,2019,42(6):1368－1377.]

[15] 朱凤荣,胡海波,杨文睿. 江苏丘陵区栎林土壤温度与水分特征[J]. 湖南农业科学,2013,52(1):39－42.[ZHU Fengrong,HU Haibo,YANG Wenrui. Soil temperature and moisture content characteristics of oak forests in hilly region Jiangsu[J]. Hubei Agricultural Sciences,2013,52(1):39－42.]

[16] 敬文茂,牛赟,刘贤德,等. 祁连山大野口流域土壤温度空间变化特征[J]. 山地学报,2016,34(2):142－149.[JING Wenmao,NIU Yun,LIU Xiande,et al. Spatial variation characteristics of soil temperature in Dayekou Basin of Qilian Mountains[J]. Mountain Research,2016,34(2):142－149.]

[17] 车宗玺,李进军,汪有奎,等. 祁连山西段草地土壤温度、水分变化特征[J]. 生态学报,2018,38(1):105－111.[CHE Zongxi,LI Jinjun,WANG Youkui,et al. Characteristics of soil temperature and water content variation in the western Qilian Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica,2018,38(1):105－111.]

[18] 李莎. 祁连山青海云杉林土壤温湿度变化特征分析[J]. 防护林科技,2016,(1):10－12.[LI Sha. Variation features of temperature and humidity of soil for *Picea crassifolia* plantation in Qilian Mountains[J]. Protection Forest Science and Technology,2016,(1):10－12.]

[19] 王绍令,丁永建,赵林,等. 青藏高原局地因素对近地表层地温的影响[J]. 高原气象,2002,(1):85－89.[WANG Shaoling,DING Yongjian,ZHAO Lin,et al. The influence of local factor on surface layer ground temperature in Qinghai-Xizang Plateau[J]. Plateau Meteorology,2002,(1):85－89.]

[20] 刘士玲,杨保国,卢立华,等. 广西大青山土壤水热特征及其对气象要素的响应[J]. 中南林业科技大学学报,2018,38(11):46－52.[LIU Shiling,YANG Baoguo,LU Lihua,et al. Soil moisture and temperature characteristics and the responses to meteorological factors in Daqingshan,Guangxi[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2018,38(11):46－52.]

[21] BEN L B,BROWM K M,CAROL G. Spatial dynamics of soil moisture and temperature in a black spruce boreal chrono sequence[J]. Canadian Journal of Forest Research,2006,36(11):2794－2802.

[22] BOND L B,WANG C,GOWER S T. Spatial-temporal measurement and modeling of boreal forest soil temperature[J]. Agricultural and Forest Meteorology,2005,131(1－2):27－40.

[23] 王红梅,王堃,米佳,等. 北方农牧交错带沽源农田－草地界面土壤水热空间特征[J]. 生态学报,2009,29(12):6589－6599.[WANG Hongmei,WANG Kun,MI Jia,et al. Spatial heterogeneity of moisture and temperature in soil across the cropland-grassland boundary in Guyuan of north agro-pastoral transition zone,China[J]. Acta Ecologica Sinica,2009,29(12):6589－6599.]

Spatial and temporal variations of soil moisture and temperature of *Picea Crassifolia* forest in north piedmont of central Qilian Mountains

MA Jian[1,2,3,4], LIU Xian-de[1,2,3,4], LI Guang[1], ZHAO Wei-jun[2,3,4],
WANG Shun-li[2,3,4], JING Wen-mao[2,3,4], MA Xue-e[2,3,4]

(1 *College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou* 730070, *Gansu, China*; 2 *Academy of Water Resources Conservation Forests in Qilian Mountains of Gansu Province, Zhangye* 734000, *Gansu, China*; 3 *International Science and Technology Cooperation Base for Forest Ecological Monitoring and Assessment in Qilian Mountains, Gansu Province, Zhangye* 734000, *Gansu, China*;
4 *Gansu Qilian Mountain Forest Ecosystem Observation and Research Station, Zhangye* 734000, *Gansu, China*)

Abstract: This study analyzes the *Picea crassifolia* forest located at the altitude of 2 500 m to 3 300 m in the northern piedmont of the central Qilian Mountains, northwest China. Five automatic soil temperature and moisture monitoring systems were used to monitor this *Picea crassifolia* forest over a continuous three-year period. The paper seeks to explore the variations of soil moisture and temperature as well as interactions between soil moisture and temperature. Our results revealed as follows: (1) from 07:00 to 19:00, soil temperature showed an overall increasing trend. The average soil temperature was the lowest at 8:00, when it was 1.03℃. The average soil temperature was the highest at 18:00 when it was 1.32℃. Variations in soil moisture were small, with insignificant differences ($P > 0.05$). (2) The cold period (January–April, November–December) and warm period (May–October) each account for six months out of the year, respectively. Soil temperature and moisture increased during each month before August, with the average temperature and moisture of soil increasing by 2.21℃ and 0.021 $m^3 \cdot m^{-3}$, respectively, each month. After August, the average soil temperature and moisture decreased by 3.12℃ and 0.017 $m^3 \cdot m^{-3}$, respectively, each month. (3) There was a negative correlation between soil temperature and elevation (R=0.81, $P < 0.05$), whereas there was a binomial correlation between soil moisture and altitude (R=0.95, $P < 0.05$). Following an increase in altitude, soil moisture first increased and then decreased. (4) There was a negative correlation between soil temperature and soil depth ($P < 0.05$), while there was a linear positive correlation between soil moisture and soil depth ($P < 0.05$). For each additional layer, the average soil temperature decreased by 0.142℃ and soil moisture increased by 0.009 $m^3 \cdot m^{-3}$. (5) There was a significant linear negative correlation between soil temperature and moisture in the *Picea crassifolia* forest studied ($P < 0.05$).

Key words: soil temperature; soil moisture; variations; *Picea crassifolia*; Qilian Mountains